第 39 卷 第 3 期
2021 年 9 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 39, No. 3
Sept., 2021

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2021.03.06

大质量星系团弥散辐射研究

谢雨杉[1,2,3]，何梦钒[1,2,3]，毛羽丰[4]，郑 倩[2]，陕欢源[2,3]，郭 铨[2]

(1. 中国科学院 国家天文台，北京 100101； 2.中国科学院 上海天文台，上海 200030； 3. 中国科学院大学，北京 100049； 4. 中国科学院 前沿科学与教育局，北京100864)

摘要： 星系团中的弥散辐射通常以位于中心区域的射电晕或周围区域的射电遗迹形式存在。根据星系团弥散辐射的陡谱特性，通过宽带低频射电波段的观测，能够得到其中射电晕及射电遗迹的频谱特征，从而帮助理解星系团的形成与演化过程。通过分析默奇森宽场阵列 (Murchison Widefield Array, MWA)、澳大利亚望远镜阵列 (Australia Telescope Compact Array, ATCA) 在射电波段对位于红移 $z = 0.098$ 的星系团 SPT J2201-5956 和位于 $z = 0.232$ 的星系团 SPT J2023-5535 的观测数据，得到了对应两个星系团的弥散辐射特性。分析结果表明 SPT J2201-5956 中弥散辐射的谱指数为 $-1.68^{+0.27}_{-0.27}$，其来源可能为星系团中的死亡星系；SPT J2023-5535 中弥散辐射的谱指数为 $-1.21^{+0.02}_{-0.02}$，且其辐射位于星系团的中心区域，因此可以认为该星系团中的弥散源是射电晕候选体。

关 键 词： 干涉测量；星系团；弥散辐射；谱指数

中图分类号： P161.4 **文献标识码：** A

1 引 言

星系团由成百上千个星系和弥漫在其中的星系团际介质构成，是宇宙中最大的引力自束缚系统。当宇宙射线和质子穿过星系团磁场获得加速时，产生弥散分布的射电同步辐射在星系团中以两种可能的形式存在：在中心区域的射电晕，或是分布在外围的射电遗迹。两种射电弥散源的产生与星系团的动力学过程，特别是星系团之间的并合有关：射电晕通常被认为是星系团中心湍流运动的结果[1]，而射电遗迹则是星系团并合过程中产生低马赫数的激波在星系团际介质中传播生成的产物[2]。

星系团中的弥散射电辐射频谱非常陡，其谱指数 $\alpha(S \approx \nu^{\alpha})$ 通常在 $-2.3 \sim -1.0$ 范围内。这样的频谱特征使得射电信号在高频段明显减弱，而在低频段的观测较容易实现，因

收稿日期： 2020-09-29； **修回日期：** 2020-10-15

资助项目： 国家重点研发计划 (2018YFA0404601)；国家自然科学基金 (10973069, 10973070)；中科院基础前沿科学研究计划从 0 到 1 原始创新项目 (ZDBS-LY-7013)；上海市浦江人才计划 (19PJ1410700, 19PJ1410800)

通讯作者： 谢雨杉，xyshan@bao.ac.cn

此低频射电波段是研究星系团中射电弥散辐射的重要波段。尽管当前已经在星系团中观测到非常多的射电晕和射电遗迹，但是在一个比较宽的频率范围内 (几百 MHz 至 GHz) 对它们的频谱分布性质研究得并不多。对单个星系团在射电频率范围内观测以及研究其光谱性质，如后发座星系团 (Coma Cluster), A521, A3562[3]，有助于推进对射电晕和射电遗迹的相关研究，帮助理解星系团在并合过程中的物理机制，最终更好地理解星系团，以及宇宙的形成与演化过程。因此对星系团的射电信号进行观测已经成为很多射电干涉阵列的主要科学目标之一，例如低频阵列[4] (low frequency array, LOFAR)，巨米波射电望远镜[5] (giant meterwave radio telescope, GMRT)，MWA[6, 7]等。值得注意的是，这些低频阵列将有能力观测到一些仅在射电低频范围可探测到信号的陡谱目标，如 Macario 等人[8]利用 GMRT 在频率 150 MHz 处观测星系团 A697，得到星系团中西北方向存在激波带来的射电遗迹，其谱指数为 $-0.9\sim-0.7$；同时星系团中存在一个 Mpc 尺度的射电晕，其谱指数在 $-2.3\sim-1.0$ 之间。

MWA (默奇森宽场阵列) 对 224 个 SPT 星系团进行了低频射电波段的观测，其中 24 个星系团具有弥散辐射。本文将主要利用 SPT J2201-5956 和 SPT J2023-5535 两个大质量并合星系团的观测数据，开展星系团内弥散射电辐射特性的研究。SPT J2201-5956 (22h01min53.3s, $-59°56'43''$)，位于红移 $z=0.098$ 处，是一个处于并合末期的大质量星系团，低频射电波段弥散辐射的尺度大约是 0.87 Mpc^2，在星系团半径约 10 kpc 以内的中心区域，存在 4 个亮度几乎相同的椭圆碰撞星系[9, 10]，Massey 等人[10]通过双子天文台 (Gemini South) GMOS 图像，利用中心星系的强引力透镜效应对该星系团进行观测，并进行与暗物质理论有关的研究。星系团 SPT J2023-5535 (20h23min24.5s, $-55°35'32''$)，位于红移 $z=0.232$ 处，其低频射电波段弥散辐射围绕星系团中心位置分布，尺度上大约为 0.9 Mpc^2，Bulbul 等人[11]利用 XMM-Newton 数据对该星系团在 X 射线波段的性质进行研究，并结合其他星系团对星系团质量、X 射线波段亮度之间的关系进行拟合。HyeongHan 等人[12]利用 ASKAP-EMU[13]对 SPT J2023-5535 的射电波段进行观测，在星系团中探测到了 1 Mpc $\times$ 0.5 Mpc 的射电晕以及约 0.5 Mpc 尺度的射电遗迹。

第 2 章介绍望远镜 (MWA：120~260 MHz, ATCA：2.1 GHz 和 4.8 GHz) 的观测数据及其处理方法。第 3 章详细介绍对 SPT J2201-5956 和 SPT J2023-5535 两个星系团中射电辐射特性的分析，给出了弥散辐射的谱指数，并对可能的形成机制进行了讨论。第 4 章是简单的总结。本文使用的宇宙学参数分别是 $H_0=73\ \mathrm{km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}}$, $\Omega_m=0.27$, $\Omega_\Lambda=0.73$。

2 观测及数据处理

2.1 MWA 数据

MWA 是位于西澳大利亚默奇森射电天文台的低频射电阵列，其工作频率范围是 70~300 MHz。本文使用的数据来自 MWA 一期 (MWA Phase I)。Tingay 等人[7]对 MWA 一期天线的设计与构型进行了详细的描述，本文在此仅做概述：MWA 一期由 128 个单元组

成，遍布在直径约 3 km 的范围之内。每个单元有 16 个偶极天线以 4×4 的方式摆放，能够实现对“X”(16 个东西向的偶极子) 和“Y”(16 个南北向的偶极子) 的极化测量。足够多的天线和单元确保了很好的 uv 覆盖范围，因此即使观测时间较短也能保证有较好的波束合成。此外，MWA 的优势之一是拥有极宽的视场 (对应 150 MHz 的视场大小为 610 平方度)，这意味着单次观测就有能力覆盖大量的天体。GLEAM[14] (GaLactic and Extragalactic All-sky MWA survey) 是 MWA 在 $72 \sim 231$ MHz 频率范围内的南天区巡天项目，星系团的研究是其重要的科学目标。本文使用 GLEAM 的观测数据对所研究的星系团进行低频射电波段的成像以及流量密度的测量。

Hurley-Walker 等人[15] 详细介绍了对 MWA 数据处理的方法，也是我们基本数据处理流程的参考方法。原始的可视度函数首先经过 `Aoflagger`[16] 去除射频干扰，然后通过观测天区内选定的定标源 (例如 PKS 0408-65) 对每个观测-天线-极化-频段进行逐一的相位校准以及流量校准，最后通过 CLEAN 进行成图。

对星系团 SPT J2201-5956 的观测分析中，我们选取 4 个子频段的 GLEAM 原始数据，中心频率分别为：120 MHz, 150 MHz, 180 MHz 和 215 MHz。在数据处理的过程中，我们采用鲁棒值 (robustness) 为 0 并对每个波段进行成图。SPT J2023-5535 的数据来自 Hindson 等人[17] 对 A3667 (位于 J2023-5535 附近) 的观测。本文使用 Hindson 等人[17] 经过处理的数据，采用鲁棒值为 +1.0 的“robust”加权，在带宽 30.72 MHz，中心频率为 120 MHz, 149 MHz, 180 MHz 及 226 MHz 的 4 个子频段进行成图。表 1 给出了两个星系团的图像在不同频段的观测性质。

表 1　MWA 图像性质

星系团名称	ν_c /MHz	RMS noise /Jy·beam^{-1}	beam /(″)
SPT J2201-5956	120	0.034	269.3 × 269.3
	150	0.028	194.8 × 194.8
	180	0.022	146.9 × 146.9
	215	0.007	126.0 × 126.0
SPT J2023-5535	120	0.053	259.6 × 189.0
	149	0.056	211.0 × 152.9
	180	0.035	179.5 × 131.6
	226	0.033	319.3 × 230.8

注：ν_c 是不同观测频段的中心频率。

2.2　ATCA 数据

ATCA 位于澳大利亚新南威尔士州的西北部，是由 6 个 22 m 天线组成的射电阵列。SPT J2201-5956 和 SPT J2023-5535 在 2.1 GHz 的数据均来自 2013 年的观测 (PI: Melanie Johnston-Hollitt)，观测利用了 ATCA 三种不同的天线构型：6A, 750D 和 EW352，观测中心频率为 2.1 GHz，带宽为 2 048 MHz。表 2 给出了本文用到的 ATCA 详细观测信息。

表 2 ATCA 观测信息

星系团名称	Configuration	Date	$t_{\rm scan}$ /min	Bandwidth /MHz	$\nu_{\rm c}$ /MHz
SPT J2201-5956	750D	2013-08-09,10,13	355.2	2 048	2 100
	6A	2013-07-20,21,22	195	2 048	2 100
	EW352	2013-06-19,20,21	224	2 048	2 100
SPT J2023-5535	750D	2013-08-09,10	约180	2 048	2 100
	6A	2013-07-20,22	约160	2 048	2 100
	EW352	2013-06-19,20	约160	2 048	2 100
	H75	2009-10-03	50.2	2 048	5 500

注：表中给出了天线分布以及观测日期，$t_{\rm scan}$ 是观测的积分时间，$\nu_{\rm c}$ 是观测的中心频率。

星系团的数据通过 MIRIAD[18] 进行处理，与对 CABB[19] (compact array broadband backend) 连续谱的处理过程一致：首先对射频干扰进行标记和去除，并将处于带通衰减 (bandpass rolloff) 区内的边缘频率通道进行标记；随后将数据分为 4 个子频段 (中心频率分别为：1 332 MHz, 1 844 MHz, 2 356 MHz 和 2 868 MHz) 对它们进行分别的校准和成图处理，本文所研究的两个星系团在 2.1 GHz 观测的校准过程中均以 PKS B1934-638 作为带通和流量校准源，PKS B2117-642 作为相位校准源；成图过程采用鲁棒值为 1 的“robust”加权方式以及标准的反卷积方法——Steer clean 算法 (3σ)——得到斯托克斯参量 I 的图像。考虑到星系团中弥散源的空间尺度比较大，适合使用短基线观测，因此在用到 ATCA 的数据探测星系团的弥散源时，没有使用最长的基线 (6 km)。在高频率 (4.8 GHz) 处，由于 uv 覆盖范围变差，同时弥散源的信号迅速减弱，ATCA 对离散点源的探测能力相对提高，因此在探测点源时使用高分辨率的天线布阵 (仅考虑 6 km 的基线)。

对于星系团 SPT J2023-5535，我们增加了 ATCA 在频率 4.8 GHz 处的观测数据，观测数据来自澳大利亚望远镜在线数据库 (Australia telescope online archive, ATOA)。对 4.8 GHz 数据的处理过程与对 2.1 GHz 数据相同，其中主校准源为 PKS B1934-638，第二校准源为 IERS B2117-614，4 个子频段的中心频率分别为 4 732 MHz, 5 244 MHz, 5 756 MHz 和 6 268 MHz。

表 3 给出了 ATCA 在两个频率 (2.1 GHz 和 4.8 GHz) 的图像性质。

此外，本文利用悉尼大学莫伦谷巡天[20, 21] (Sydney University Molonglo Sky Survey, SUMSS) 给出的 843 MHz 射电星表，帮助分辨和扣除 SPT J2023-5535 中的点源。

2.3 X 射线数据

Chandra X 射线天文台对星系团 SPT J2201-5956 (观测日期：2007-08-20，ObsID：7920，曝光时间：50.0 ks) 和 SPT J2023-5535 (观测日期：2014-03-30，ObsID：15108，曝光时间：20.81 ks) 进行了观测。本文从 Chandra 数据库中下载目标星系团的 X 射线原始数据，并用官方软件 CIAO (http://cxc.cfa.harvard. edu/ciao/, version4.9) 以及 CALDB v4.6.2 进行处理。原始数据经“chandra_repro”工具进行校准，并创建校准标准等于 2 的文件；

表 3　ATCA 图像性质

	ν_c /MHz	RMS noise /Jy·beam^{-1}	beam /($''$)	PA /($^\circ$)	uv-range /$10^3\lambda$
2.1 GHz	1 332	0.071	22.87 × 14.35	−27.85	19.8 (13.0)
	1 844	0.044	17.92 × 12.24	−26.24	27.5 (18.0)
	2 356	0.041	14.83 × 10.10	−27.18	35.1 (23.0)
	2 868	0.039	13.45 × 9.30	−27.65	42.7 (28.0)
4.8 GHz	4 732	0.072	124.4 × 96.01	−78.57	69.5 (1.4)
	5 244	0.064	112.0 × 84.95	−79.86	77.1 (1.6)
	5 756	0.068	101.4 × 75.40	−79.93	84.6 (1.7)
	6 268	0.081	91.46 × 68.86	−80.45	92.1 (1.9)

注：其中 ν_c 是不同观测频段的中心频率，RMS noise 和 beam 为不考虑 6 km 基线时的取值，最后一列分别给出考虑和不考虑 6 km 基线时的 uv 覆盖范围。

接下来通过工具“`lc_clean`”去除被如太阳活动等影响的观测时间；最终“`fluximage`”工具能够在软X射线波段 (0.5~2.0 keV) 重新创建改正有效曝光时间的图像。图像中的亮源通过“`celldetect`”工具探测到，通过人工再次检查后由“`dmfilth`”工具将其扣除。

3　星系团射电弥散辐射研究

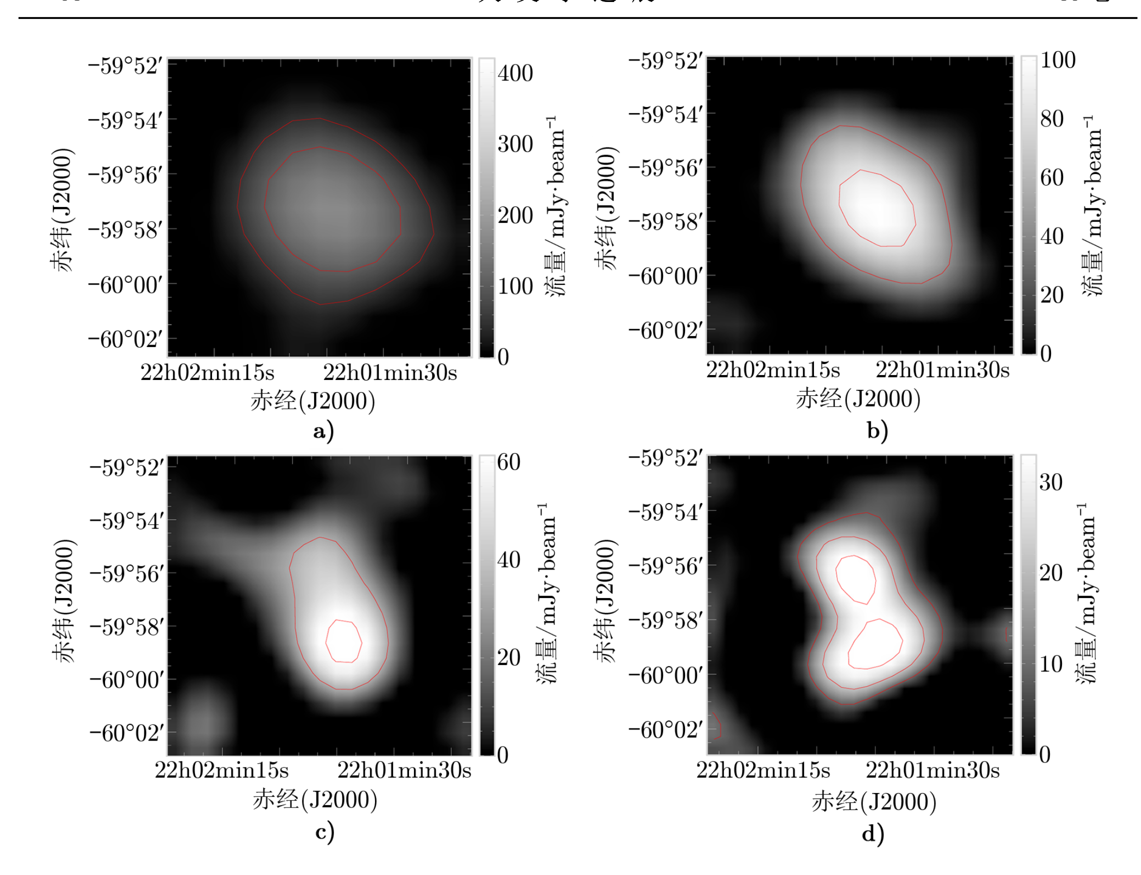
基于以上数据处理过程，我们可以得到不同波段的星系团图像，从而对星系团射电弥散辐射性质开展研究。

3.1　SPT J2201-5956

3.1.1　星系团弥散辐射谱特性研究

图 1 给出了 SPT J2201-5956 在 MWA 四个频段内的图像，可以看出，该星系团的中心存在大尺度的弥散辐射。

为了精确测量图像中的弥散辐射，首先需要扣除点源的影响。考虑角分辨率和 uv 覆盖能力的限制，区分离散点源和弥散辐射仅使用了 6 km 基线的高分辨率观测，同时选用最高频段的数据以达到最高的分辨率水平。最终我们在 MWA 图像所涵盖的星系团空间范围内找到了两个点源：源 1 (22h03min1.95s, $-59^\circ56'18.41''$) 和源 2 (22h01min49.33s, $-59^\circ55'34.69''$)。在确定了点源的位置之后，需要用 ATCA 低分辨率图像的 4 个子频段对每个点源的流量 S 进行测量：$S_1^{1332} = 1.34$ mJy, $S_1^{1844} = 1.26$ mJy, $S_1^{2356} = 1.22$ mJy, $S_1^{2868} = 0.82$ mJy; $S_2^{2356} = 1.15$ mJy, $S_2^{2868} = 1.11$ mJy，其中下标数字表示源 1 或源 2 的流量，上标数字表示测得流量对应频段的中心频率。由于图像的 uv 覆盖不足，我们不能精确测量两个较低频段图像中源 2 的流量，因此在谱指数拟合的过程中不考虑这两个低频测量点。我们通过 $S \approx \nu^\alpha$ 结合测得点源的流量对源 1 和源 2 的谱指数进行拟合，得到 $\alpha_1 = -0.60$, $\alpha_2 = -0.20$。



注：a), b), c), d) 分别为 120, 150, 180, 215 MHz 频段的图像。a), b), c) 中红色实线表示 1.5σ 和 3σ 的轮廓；d) 中红色实线表示1.5σ, 3σ 和 5σ 的轮廓。

图 1　MWA 观测到的星系团 SPT J2201-5956 的图像

ATCA 图像相对 MWA 图像有更高的分辨率，因此可以用来对前景点源辐射进行证认，并获得点源的谱指数以及 ATCA 观测频率范围内的流量；而 MWA 能够清晰地观测到大尺度的弥散辐射，通过在 MWA 图像中星系团的空间范围内对流量密度进行积分，可以得到总流量。根据点源的谱指数将其流量外推到 MWA 的频率范围，并在总流量中扣除，最终能够得到弥散辐射的积分流量密度。由于 MWA 图像流量定标的误差，以及 ATCA 的 uv 覆盖不足造成的误差，我们在弥散辐射流量测量时考虑了 20% 的误差。

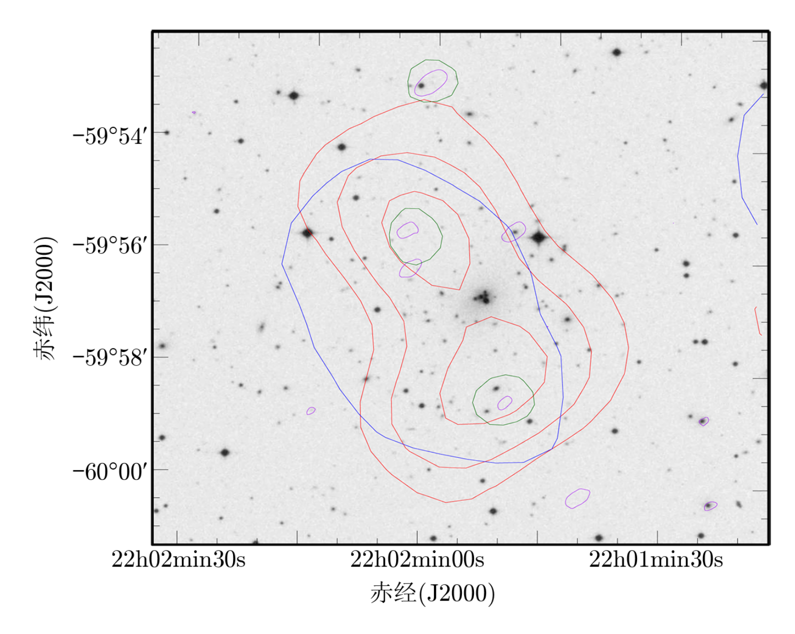
除 MWA 和 ATCA 的数据以外，对于此星系团我们增加了 408 MHz 的 Molonglo 图像。与 MWA 图像的处理方法相同，在图像总流量中扣除点源辐射后，得到弥散源的流量，并考虑 10% 的误差。

我们对弥散源的流量和谱指数考虑与点源相同的幂律关系 $S \approx \nu^{\alpha}$，并在对数空间进行拟合：扣除点源前，星系团在 MWA 频率范围内的谱指数为 $\alpha = -1.61^{+0.27}_{-0.27}$，而如果将 408 MHz 的 Molonglo 数据加入拟合，谱指数变为 $\alpha = -1.32^{+0.09}_{-0.09}$；将点源扣除后，星系团的谱指数分别为 $\alpha = -1.68^{+0.27}_{-0.27}$ (不加入 Molonglo 数据) 和 $\alpha = -1.17^{+0.10}_{-0.10}$ (加入 Molonglo 数据)。

3.1.2 星系团射电弥散源的起源

Brunetti 等人[22]提出，相比射电遗迹而言，射电晕在较低频率处开始逐渐占主导，因为射电晕的频谱相对更陡，谱指数 α 大约为 -1.5。在上一节中我们测得 SPT J2201-5956 中射电弥散辐射的谱指数 $\alpha = -1.68^{+0.27}_{-0.27}$，并且其投影位置处在星系团的中心区域，这意味着弥散源可能是一个大尺度的射电晕。我们进一步研究了射电晕的辐射功率与 X 射线亮度 $L_{\rm X}$ 及星系团总质量 M_{500} 之间的关系：$L_{\rm X}(0.1 \sim 2.4~{\rm keV}) = 2.1 \times 10^{37}~{\rm J \cdot s^{-1}}$[23]，$M_{500} = (4.30 \pm 0.28) \times 10^{14} M_{\odot}$，同时根据谱指数我们得到射电弥散辐射在 1.4 GHz 处的辐射功率为 $P_{1.4} = 5.31 \times 10^{22}~{\rm W \cdot Hz^{-1}}$。Cassano 等人[24]提出射电晕与 X 射线亮度之间可以通过简单的幂律关系拟合：$\lg(P_{1.4}) = A + B\lg(L_{\rm X})$，我们对包含 SPT J2201-5956 在内的 61 个星系团的射电辐射进行拟合，得到射电晕的拟合参数 (A, B)=(−27.85, 1.16)；Cassano 等人[24]也提出另一种关系：$\lg(P_{1.4}) = A + B\lg(M_{500})$，对 SPT J2201-5956 等 52 个星系团中的射电晕而言，拟合参数应为 (A, B)=(−17.98, 2.85)。

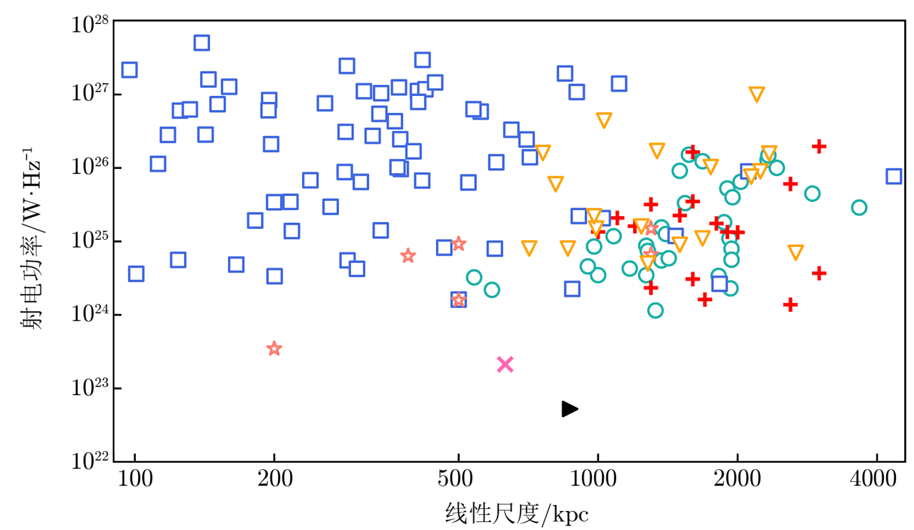
图 2 展示了不同频率的射电观测 (170~231 MHz MWA, 843 MHz SUMSS, 408 MHz Molonglo 和 2 868 MHz ATCA) 在光学图像 (SuperCOSMOS) 上的叠加。从图 2 中可以看出，SPT J2201-5956 位于两侧的射电弥散辐射近似呈双对称形态，而两个子分布与星系团中心的距离也相近，分别为 239.29 $\rm h^{-1} \cdot kpc$ 和 193.39 $\rm h^{-1} \cdot kpc$，因此弥散源不排除是射电遗迹的可能，其中位于东北的遗迹 (在 1 844 MHz 大于 1.75 mJy) 更亮 (西南的射电遗迹大于 1.19 mJy)。



注：在光学图像上分别叠加：170 ~ 231 MHz MWA (红色) 1.5σ, 3σ, 5σ 的轮廓线，以及 843 MHz SUMSS (绿色)、408 MHz Molonglo (蓝色)、2 868 MHz ATCA (紫色) 的轮廓线。

图 2 星系团 SPT J2201-5956 的光学图像 (SuperCOSMOS)

当星系团中的射电弥散辐射分布为两瓣、且辐射为陡谱时，弥散辐射的形成可能与死亡的射电星系有关。AGN 通过等离子体为椭圆星系中的射电源提供能量，一旦这样的供能过程停止，射电源将会经历衰退。在射电源衰退期间，由于缺失射电核、喷流或是热点，可以观测到源中较早活动时期留下的射电等离子体，这样的等离子体射电辐射有非常陡的谱，其谱指数 α 通常会小于 -1.5。SPT J2201-5956 中的射电弥散辐射没有观测到核、喷流以及热点等特征，并且谱指数为 $-1.68^{+0.27}_{-0.27}$，因此星系团中的弥散辐射起源有很大可能是一个死亡星系。我们对 Hurley-Walker 等人[25] 图 5 中的星系重新计算得到星系在 1.4 GHz 的射电辐射功率，如图 3 所示，包括 SPT J2201-5956 在内射电星系的功率-尺度图。与典型的 FR-I 和 FR-II 射电星系[26]、Schoenmakers 等人[27] 及 Sault 等人[18] 发现的巨射电星系 (giant radio galaxy, GRG)、NGC 1534 相关的 GRG[25] 相比，SPT J2201-5956 中的射电瓣非常暗，因此符合死亡星系的特征。综合上述讨论，考虑到 SPT J2201-5956 中射电辐射的尺度、极化、有无核、光学对应体等特征信息 (见表 4)，我们认为该星系团中探测到的大尺度射电弥散辐射的起源可能为死亡的射电星系。



注：图中蓝色方形是 Laing 等人[26] 给出的红移 $z < 0.6$ 的 FR-I 和 FR-II 射电星系，橙色三角代表 Saripalli 等人[28] 观测到的 GRGs，绿色圆形是 Schoenmakers 等人[27] 观测到的 GRGs，红色十字代表来自 1998 年前的观测，粉橙色星号表示 Hurley-Walker 等人[25] 给出的盘星系对应的射电星系，粉色 “x” 表示 Hurley-Walker 等人[25] 观测到的 NGC 1534 的射电瓣，黑色三角是本文所研究的 SPT J2201-5956 中的射电辐射。

图 3　射电星系的线性尺度与 1.4 GHz 射电辐射功率之间的关系图

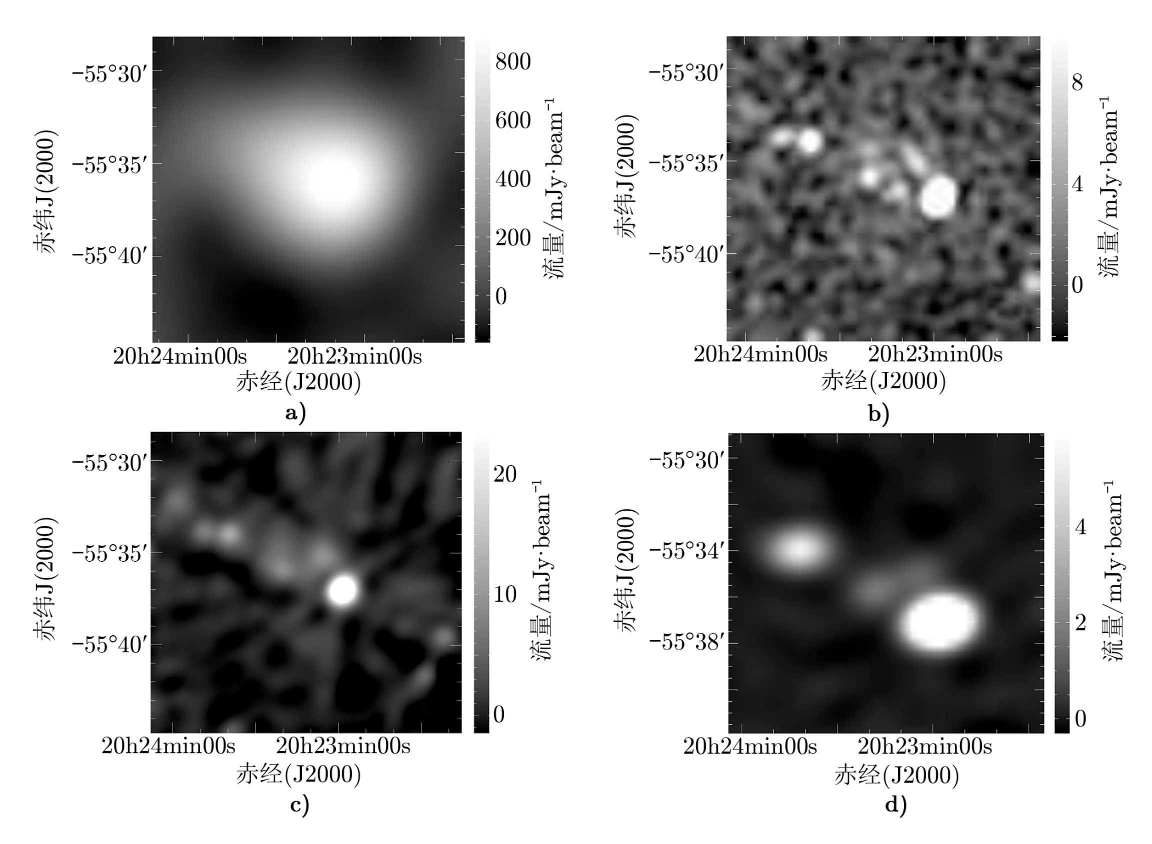
表 4　对 SPT J2201-5956 中与起源相关的弥散辐射特征总结

辐射特征	射电晕	射电遗迹	死亡射电星系
大尺度结构	符合	符合	符合
偏振	符合	不符合	—
无射电核	不符合	不符合	符合
无光学对应体	不符合	不符合	符合

3.2 SPT J2023-5535

3.2.1 星系团弥散辐射谱特性研究

我们进一步对星系团 SPT J2023-5535 基于 MWA 和 ATCA 的数据进行了分析，如图 4 所示，其中 ATCA 2.1 GHz, 4.8 GHz, MWA 图像分别以半高全宽为 $60'' \times 60''$, $150'' \times 150''$, $351'' \times 254''$ 的高斯函数经卷积做平滑处理。



注：a) MWA，中心频率为 120 MHz；b) SUMSS；c) ATCA 2.1 GHz；d) ATCA 4.8 GHz。其中 ATCA 两个频率处的图像均为其 4 个 512 MHz 的子频段的合成图像。

图 4 不同观测中的 SPT J2023-5535 图像

与 3.1.1 节一致，在探测 SPT J2023-5535 中的射电弥散辐射时，首先考虑对图像中点源的扣除。结合高分辨率的 2.1 GHz ATCA 图像以及 843 MHz SUMSS 的射电星表，我们观测到共有 4 个点源分布在星系团的弥散辐射范围内，坐标分别为 (20h22min58.1s, $-55°37'4.9''$), (20h23min19.3s, $-55°36'3.0''$), (20h23min39.2s, $-55°33'56.8''$), (20h23min47.0s, $-55°33'47.1''$)。为得到最终星系团中弥散源的流量，我们利用 DUCHAMP[29] 对点源的流量进行拟合，其中 2.1 GHz 的高分辨率 ATCA 图像和 SUMSS 能够实现对 4 个点源的拟合，同时增加了 4.8 GHz ATCA 的图像，但由于在频率 4.8 GHz 处的观测时间短，uv 覆盖范围不大，仅能够实现对其中的一个亮源流量进行测定。

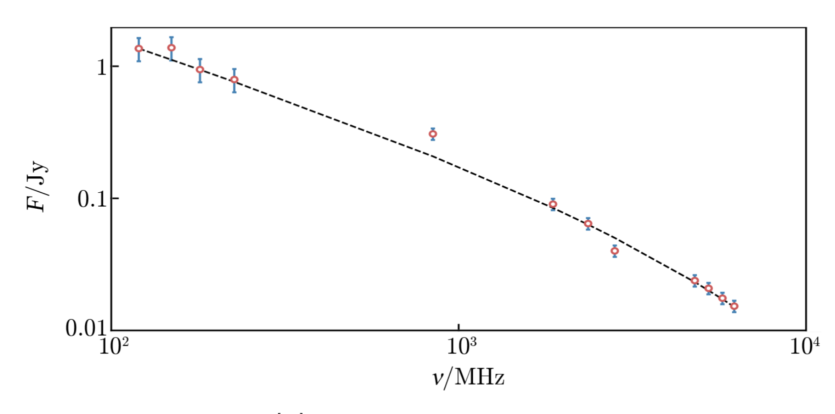
经过对点源测定流量并对谱指数进行拟合，SPT J2023-5535 中的 4 个点源的谱指数分别为 $\alpha=-1.08^{+0.03}_{-0.03}$, $\alpha=-1.51^{+0.07}_{-0.06}$, $\alpha=-0.67^{+0.06}_{-0.07}$, $\alpha=-1.09^{+0.06}_{-0.06}$。与 NASA/IPAC 河外数据库 (NASA/IPAS Extragalactic Database, NED) 对比，我们对源 1、源 3、源 4 在 843 MHz 进行了流量测量，所得结果一致；而源 2 的流量低于 NED 中的记录值，这是由于图像的分辨率过低，给观测带来了误差。

将 4 个点源的流量外推到 MWA 和 ATCA 4.8 GHz 的频率，并在图像中扣除，最终得到 SPT J2023-5535 中射电弥散辐射的流量。因为 MWA 图像分辨率较低，并且对流量标的测定并不完全准确，我们考虑 20% 的流量误差；ATCA 的 uv 覆盖能力也会带来流量测定的误差，在此设为 10%；SUMSS 的图像流量误差也设为 10%。最终，经流量计算及拟合，在 120 MHz~6 268 MHz 的频率范围内，辐射的谱指数在扣除点源前为 $\alpha=-1.17^{+0.02}_{-0.01}$。扣除点源后，如果在辐射的流量与谱指数之间仅考虑简单的幂律关系，经拟合得到 $\alpha=-1.21^{+0.02}_{-0.01}$；但事实上我们发现，在低频端 MWA 的数据与高频端 ATCA 的数据之间，谱指数出现转折，此时如果仅考虑常数形式的谱指数，将会使 MWA 图像中的流量密度被低估。分开考虑的情况下，利用 MWA 数据得到的谱指数 $\alpha_{\rm MWA}=-0.78^{+0.06}_{-0.04}$，而利用 ATCA 的数据得到的谱指数为 $\alpha_{\rm ATCA}=-1.47^{+0.03}_{-0.03}$。

3.2.2 理论模型

在本节中，我们将测得的 SPT J2023-5535 中射电弥散辐射的频谱与射电遗迹和射电晕的理论模型进行拟合比较。

理论上，星系团之间并合会在星系团的边界处和大尺度纤维状结构中产生激波，激波在星系团际介质中的传播最终导致射电遗迹的出现。根据 Enßlin 和 Gopal-Krishna[30] 给出的射电遗迹理论模型，我们对 SPT J2023-5535 中的弥散源拟合，得到电子谱的谱指数 $\alpha_e=2.67$。弥散源与射电遗迹的理论模型之间的拟合如图 5 所示。观测给出 SPT J2023-5535 的磁场在 10^{-10} T 量级，考虑观测误差我们假设其磁场约 10^{-10} T，根据 Enßlin 和 Gopal-Krishna[30] 的理论计算得知星系团弥散辐射中的电子动量最大值 $p_*\approx10^5$。



注：虚线是 Enßlin 和 Gopal-Krishna[30] 中给出的计算公式在电子谱指数 $\alpha_e=2.67$ 的情况下得到的辐射谱。

图 5 以射电遗迹模型对 SPT J2023-5535 中的射电弥散源拟合的辐射谱

Schlickeiser 等人[31] 和 Thierbach 等人[32] 分别利用后发座星系团对射电晕的模型进行了研究，提出了原位 (in-situ) 模型：相对论电子的原位加速能够与星系团际介质的能量损失抗衡。我们使用同样的 In-situ 模型对 SPT J2023-5535 中的弥散辐射进行拟合，模型共有两个自由参数 Γ 和 ν_s；模型给出射电晕的频谱符合幂律形式，并且在高频端会出现一个截断，其中，ν_s 是对应的截断频率，Γ 是在截断频率前频谱的谱指数。在 SPT J2023-5535 中，拟合得到的参数结果分别为 $\Gamma = 4.34^{+0.13}_{-0.14}$ 和 $\nu_s = 1.23^{+0.31}_{-0.26}$GHz，与 Thierbach 等人[32] 得到的射电晕模型结果 ($\Gamma = 4.6^{+0.8}_{-0.8}$, $\nu_s = 0.44^{+3.11}_{-0.28}$GHz) 一致。图 6 给出了利用射电晕模型对弥散辐射的拟合结果。

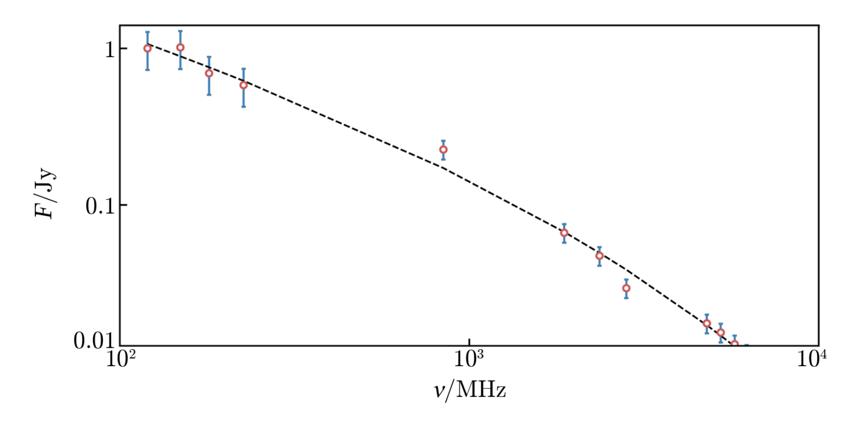
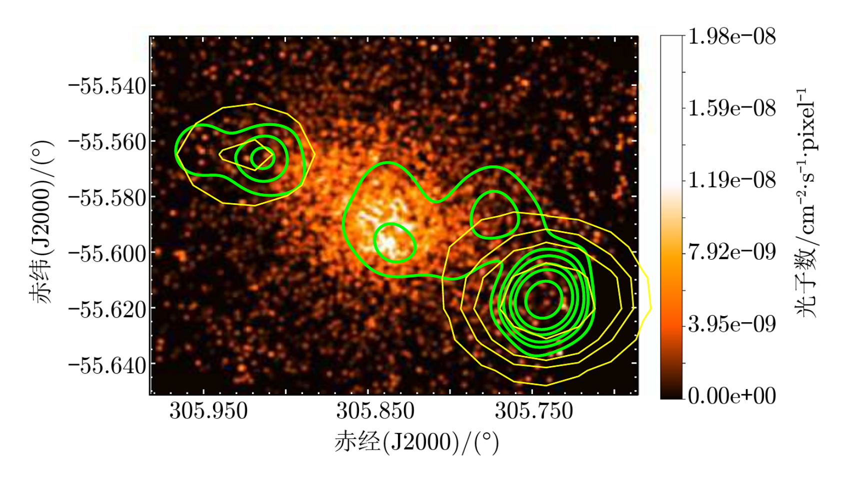


图 6 以射电晕模型对 SPT J2023-5535 中的射电弥散源拟合的辐射谱

由上述讨论可知，SPT J2023-5535 中的射电弥散辐射与射电遗迹和射电晕的理论模型都符合。但如图 7 所示，X 射线图像给出了星系团的中心位置，而星系团的弥散辐射也是分布在中心区域的，因此我们认为 SPT J2023-5535 中的弥散辐射是一个射电晕候选体。



注：黄色轮廓线为 4.8 GHz ATCA 的图像，绿色轮廓线为 2.1 GHz ATCA 图像。

图 7 Chandra 软 X 射线 (0.5~2.0 keV) 图像与射电辐射轮廓的叠加

4 总结与展望

由于星系团弥散辐射的陡谱特性，相比其他波段，低频射电波段更有利于进行星系团弥散辐射的观测和研究，从而有助于深入理解射电晕和射电遗迹的性质。通过 MWA 和 ATCA 对大质量星系团 SPT J2201-5956 和 SPT J2023-5535 的观测，我们得到了其中射电弥散辐射的空间分布和谱指数。根据星系团中弥散源的频谱特征，我们进一步结合可能的模型对弥散辐射进行拟合，讨论星系团中弥散源的起源。经过分析可知，SPT J2201-5956 中弥散辐射的起源可能为死亡星系，SPT J2023-5535 中的弥散辐射可能为位于星系团中心的射电晕。

MWA 由于分辨率不足无法辨认出星系团中的离散点源，而 ATCA 由于 uv 覆盖能力较低无法完整探测到星系团中的弥散辐射，因此本文通过结合 MWA 和 ATCA 对射电辐射进行探测。将来为了更好地理解星系团中的弥散辐射，仍需要有更好 uv 覆盖及高分辨率的望远镜来做进一步研究。当前，MWA 二期已经投入运行，分辨率和灵敏度都显著提高，将更适合用来研究弥散源。在未来几年中，LOFAR[4] 和 MWA 预计都将进行一系列的巡天观测，我们将有机会观测到更多星系团中的射电弥散源。此外，SKA[33] 时代的到来将会大幅提升观测灵敏度，除对每个射电源进行更加精准的观测之外，可观测的射电源数密度也会大幅增加，可以开展对射电弥散辐射的统计测量工作。

参考文献：

[1] Miniati F. ApJ, 2015, 800(1): 60
[2] van Weeren R J, de Gasperin F, Akamatsu H, et al. Space Sci. Rev., 2019, 215(1): 16
[3] Giacintucci S, Venturi T, Brunetti G, et al. A&A, 2005, 440: 867
[4] van Haarlem M P, Wise M W, Gunst A W, et al. A&A, 2013, 556: A2
[5] Swarup G. IAU Colloq. 131, 1991, 19: 376
[6] Lonsdale C J, Cappallo R J, Morales M F, et al. IEEE Proceedings, 2009, 97: 1497
[7] Tingay S J, Goeke R, Bowman J D, et al. PASA, 2013, 30: e007
[8] Macario G, Venturi T, Dallacasa D, et al. Mem. Soc. Astron. Italiana, 2011, 82: 557
[9] Williams L L R, Saha P. MNRAS, 2011, 415: 448
[10] Massey R, Williams L, Smit R, et al. MNRAS, 2015, 449: 3393
[11] Bulbul E, Chiu I N, Mohr J J, et al. ApJ, 2019, 871(1): 50
[12] HyeongHan K, Jee M J, Rudnick L, et al. ApJ, 2020, 900(2): 127
[13] Norris R P, Hopkins A M, Afonso J, et al. PASA, 2011, 28(3): 215
[14] Wayth R B, Lenc E, Bell M E, et al. PASA, 2015, 32: e025
[15] Hurley-Walker N, Morgan J, Wayth R B, et al. PASA, 2014, 31: e045
[16] Offringa A R, Wayth R B, Hurley-Walker N, et al. PASA, 2015, 32: e008
[17] Hindson L, Johnston-Hollitt M, Hurley-Walker N, et al. MNRAS, 2014, 445: 330
[18] Sault R J, Teuben P J, Wright M C H. Astronomical Data Analysis Software and Systems IV, 1995, 77: 433
[19] Wilson W E, Ferris R H, Axtens P, et al. MNRAS, 2011, 416(2): 832
[20] Bock D C J, Large M I, Sadler E M. AJ, 1999, 117: 1578

[21] Mauch T, Murphy T, Buttery H J, et al. MNRAS, 2003, 342: 1117
[22] Brunetti G, Giacintucci S, Cassano R, et al. Nature, 2008, 455: 944
[23] Carrasco E R, Gomez P L, Verdugo T, et al. ApJ, 2010, 715(2): L160
[24] Cassano R, Ettori S, Brunetti G, et al. ApJ, 2013, 777: 141
[25] Hurley-Walker N, Johnston-Hollitt M, Ekers R, et al. MNRAS, 2015, 447: 2468
[26] Laing R A, Riley J M, Longair M S. MNRAS, 1983, 204: 151
[27] Schoenmakers A P, de Bruyn A G, Röttgering H J A, et al. A&A, 2001, 374: 861
[28] Saripalli L, Hunstead R W, Subrahmanyan R, et al. AJ, 2005, 130(3): 896
[29] Whiting M T. MNRAS, 2012, 421: 3242
[30] Enßlin T A, Gopal-Krishna. A&A, 2001, 366: 26
[31] Schlickeiser R, Sievers A, Thiemann H. A&A, 1987, 182: 21
[32] Thierbach M, Klein U, Wielebinski R. A&A, 2003, 397: 53
[33] Ekers R. http://www.arxitics.com/articles/1212.3497, arXiv:1212.3497, 2012

Detection of Diffuse Emission in Massive Galaxy Clusters with Radio Interferometers

XIE Yu-shan[1,2,3], HE Meng-fan[1,2,3], MAO Yu-feng[4], ZHENG Qian[2], SHAN Huan-yuan[2], GUO Quan[2]

(1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Shanghai 200030, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Bureau of Frontier Sciences and Education, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China)

Abstract: Galaxy clusters have long been known to host diffuse, steep spectrum, synchrotron radio emission either in the central part of the cluster in the case of radio halos, or on the periphery in the case of radio relics. Detection of diffuse cluster emission across a wide range of frequency can help with understanding the formation of radio halos and radio relics, and even the formation of galaxy clusters and the Universe. We present the detection of diffuse radio emission associated with the massive galaxy clusters SPT J2201-5956 and SPT J2023-5535 by using wide-band data from MWA at 70∼300 MHz and ATCA at 2.1 GHz. We detected a radio emission of 0.87 Mpc^2 within the cluster SPT J2201-5956, and 0.9 Mpc^2 in extent associated with SPT J2023-5535. We characterized the spectral index of the diffuse emission, and found SPT J2201-5956 with $\alpha = -1.68^{+0.27}_{-0.27}$, SPT J2023-5535 with $\alpha = -1.21^{+0.02}_{-0.02}$. The origins of the diffuse emission in SPT J2201-5956 could be dead galaxies, while the diffuse emission in SPT J2023-5535 could be a radio halo candidate.

Key words: interferometric; cluster of galaxies; diffuse emission; spectral index